

щи нескольких циклов центрифугирования при 20000 g в течение 30 мин.

Описанный метод позволяет синтезировать наночастицы размером 180 нм с индексом полидисперсности менее 0,2. Варьируя pH и концентрацию раствора желатина, а также объем плохого растворителя можно регулировать размер наночастиц в пределах от 120 до 500 нм.

Преимуществами описанного метода является возможность синтезировать наночастицы из желатина с любым числом Блума. Традиционные подходы к синтезу желатиновых наночастиц

методом десольватации, требуют осуществлять предварительное осаждение низкомолекулярных фракций, а также длительное контролируемое перемешивание раствора желатина и медленное (несколько мл/мин) добавления плохого растворителя [6]. Предложенный нами метод позволяет преодолеть эти ограничения и существенно упростить синтез желатиновых наночастиц.

Исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-015-00408 А.

### Список литературы

1. Gomez-Guillen M.C., Gimenez B., Lopez-Caballero M.E., Montero M.P. // *Food Hydrocolloids*, 2011. – V. 25. – I. 8. – P. 1813–1827.
2. Bello A.B., Kim D., Kim D., Park H., Lee S.H. // *Tissue engineering. Part B, Reviews*, 2020. – V. 26. – I. 2. – P. 164–180.
3. Clark C.C., Aleman J., Mutkus L., Skardal A. // *Bioprinting*, 2019. – V. 16. – статья № e00058.
4. Feng X., Dai H., Ma L., Fu Y., Yu Y., Zhou H., Guo T., Zhu H., Wang H., Zhang Y. // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2020. – V. 196. – статья № 111294.
5. Varanko A., Saha S., Chilkoti A. // *Advanced drug delivery reviews*. – V. 156. – P. 133–187.
6. Geh K.J., Hubert M., Winter G. // *Journal of microencapsulation*, 2016. – V. 33. – I. 7. – P. 595–604.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА БИОРЕЗОРБИРУЕМЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН НА ОСНОВЕ ПОЛИ-3-ОКСИБУТИРАТА

П.В. Чернозем, Р.В. Чернозем, М.А. Сурменева  
Научный руководитель – д.т.н., доцент Р.А. Сурменев

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
634050, Россия, Томск, проспект Ленина, 30, rsurmenev@mail.ru

**Введение.** Поли-3-оксибутират (ПОБ) – один из наиболее широко используемых синтетических биоразлагаемых полимеров в тканевой инженерии из-за отсутствия токсичности продуктов его метаболизма. Кроме того, ПОБ обладает пьезоэлектрическими свойствами, которые позволяют оказывать электромеханическую стимуляцию клеток, что ускоряет восстановление поврежденных тканей, в особенности, при применении 3D скэффолдов, имитирующих внеклеточный матрикс [1]. Однако, кристаллическая структура ПОБ, определяющая его пьезосвойства, до сих пор недостаточно полно изучена. Доминантная орторомбическая  $\alpha$ -фаза ПОБ [2] демонстрирует сдвиговые пьезоэлектрические константы ( $d_{14}$ ,  $d_{25}$ ,  $d_{36}$ ) [3], изучение которых является трудной научно-технической задачей даже с помощью высокотехнологических методов, как сканирующая зондовая микроскопия

(СЗМ). Таким образом, цель данной научно-исследовательской работы заключается в моделировании прямого и обратного пьезоэффектов микроволокна на основе ПОБ.

**Методы.** Моделирование прямого и обратного пьезоэлектрических эффектов ПОБ волокна (рис. 1) длиной 4 мкм и радиусом кривизны 2 мкм было выполнено с помощью метода конечных элементов в Comsol Multiphysics v.5.6 (Швеция). Плоская поверхность волокна, представляющая собой заземленную подложку, была статична. При моделировании прямого пьезоэффекта давление составляло 1 МПа (рис. 1а). При обратном пьезоэффекте разность потенциалов между заземленной подложкой и линией длиной 50 нм в верхней части волокна (рис. 1б), имитирующей область контакта волокна с проводящим зондом СЗМ, составляла 9 В. Значения матрицы упругих свойств  $\alpha$ -фазы ПОБ [2] и

пьезоэлектрических коэффициентов  $d_{14} = -1$  или  $-2$  пК/Н [4];  $|d_{25}| = |-d_{14}|$ ;  $d_{36} = d_{25}$  взяты из литературных данных.

**Результаты и их анализ.** Из полученных результатов видно, что при прямом пьезоэффекте максимальные значения пьезопотенциала  $\alpha$ -фазы ПОБ различной полярности наблюдаются в радиальном направлении вблизи заземленной подложки (рис. 1а). Кроме того, при обратном пьезоэффекте «скручивающее» смещение (деформация) наблюдается в верхней части волокна (50 нм), имитирующей область контакта с зондом СЗМ (рис. 1б).

Также, видно (таблица 1), что двукратное увеличение значений сдвиговых пьезоэлектри-

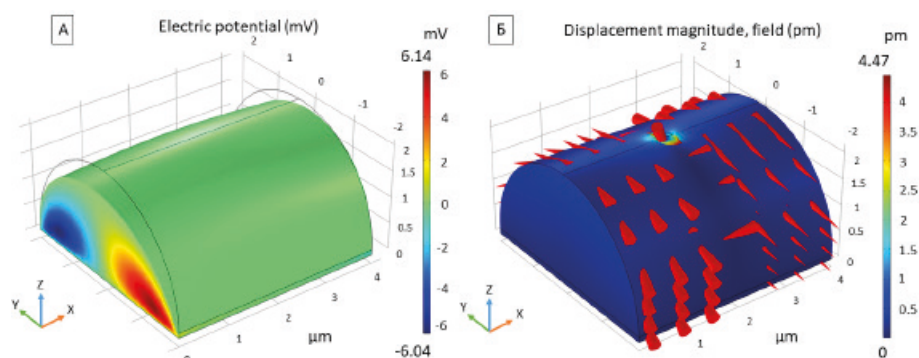
ческих констант  $\alpha$ -фазы ПОБ приводит к пропорциональному увеличению максимальных значений пьезоотклика – потенциала и смещения (деформации) волокна.

**Закключение.** Полученные результаты моделирования пьезоотклика  $\alpha$ -фазы ПОБ волокон будут необходимы при изучении электромеханических свойств других кристаллических фаз ПОБ, а также анализе биологического взаимодействия имплантатов на основе ПОБ в динамических механических условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ №20-63-47096 и стипендии Президента РФ (СП-509.2021.4).

**Таблица 1.** Максимальное значение потенциала/смещения

Константы, пК/Н	Потенциал, мВ	Смещение, пм
$d_{14} = -1$ ; $d_{25} = 1$ ; $d_{36} = 1$	3,07	$x - 1,1$ ; $y - 2,2$ ; $z - 0,3$
$d_{14} = -2$ ; $d_{25} = 2$ ; $d_{36} = 2$	6,14	$x - 2,1$ ; $y - 4,3$ ; $z - 0,7$



**Рис. 1.** (а) Распределение потенциала при прямом пьезоэффекте; (б) Распределение смещения при обратном пьезоэффекте

### Список литературы

1. Chernozem R.V., et al. // *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019. – №11. – P. 19522–19533.
2. Wang H., Tashiro K. // *ACS Macromolecules*, 2016. – №49. – №2. – 5810–594.
3. Най Дж. *Физические свойства кристаллов.* – М.: Издательство Иностранной литературы, 1960. – 152 с.
4. Tandon B., et al. // *Acta Biomaterialia*, 2018. – №73. – 1–20.